

# **Intensidad de turbulencia en la catenaria inducida por barreras cortavientos en viaductos**

**Sergio Ávila Sánchez, José Meseguer, Oscar López García**

IDR/UPM, E.T.S.I. Aeronáuticos Universidad Politécnica de Madrid, España

**Agustín Fernández Sanz, José Conrado Martínez Acevedo**

ADIF, España

## **RESUMEN**

El viento lateral puede comprometer tanto la operación segura de los trenes de alta velocidad, especialmente en tramos de vía desprotegidos, como la regularidad del servicio, ya que puede generar oscilaciones de gran amplitud en la catenaria por efectos de galope. La instalación de barreras cortaviento permite reducir las cargas aerodinámicas inducidas por el viento lateral sobre el tren, pero también influye en el nivel de intensidad de turbulencia en los cables de contacto de la catenaria.

Para estimar la influencia del ángulo de ataque y de distintas barreras cortavientos, se han realizado una serie de ensayos en túnel aerodinámico para medir la intensidad de turbulencia en la catenaria. Mediante un equipo de anemometría de hilo caliente se obtienen las series temporales de velocidad de viento de una configuración bidimensional del problema, a partir de las cuales se determina la intensidad de turbulencia. Los ensayos muestran, como se podía esperar, que la intensidad de turbulencia en el hilo de contacto aumenta cuando la estela generada por el parapeto incide sobre la catenaria.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Tanto el entorno como la forma de los vehículos determinan la carga aerodinámica por efectos de viento transversal sobre los trenes. Dichas cargas influyen en el equilibrio lateral del vehículo de tal manera que pueden producir el vuelco del mismo si la velocidad del viento sobrepasa cierto valor. El riesgo de vuelco aumenta en zonas expuestas, como es el caso de los viaductos debido al aumento de la velocidad con la altura en la capa límite atmosférica, y de los terraplenes por el incremento de velocidad del viento producido por la presencia de la pendiente. El viento transversal puede ocasionar otras dificultades en el funcionamiento del sistema ferroviario. El sistema de cables encargado suministrar al tren de energía eléctrica, catenaria, es particularmente vulnerable a problemas relacionados con el viento (Johnson, 1996). La compleja interacción dinámica de tren, catenaria y pantógrafo se complica aún más en presencia de fuertes vientos. La forma de la sección transversal del hilo de contacto puede presentar fenómenos de galope, caracterizado por la aparición de oscilaciones no amortiguadas de la catenaria cuando actúan fuerzas aerodinámicas no estacionarias sobre el hilo de contacto. Los esfuerzos para abordar el problema del galope de catenarias se han limitado por el momento al criterio lineal de Glauert-Den Hartog (Stickland y Scanlon, 2001).

Las cargas aerodinámicas que el viento transversal produce sobre trenes constituye un problema de interés para muchos científicos, habiéndose analizado en estudios experimentales (Baker, 1986; Kwon et al., 2001; Suzuki et al., 2003, Sanquer et al., 2004; Barcala y Meseguer, 2007) y numéricos (Khier et al., 2000; Diedrichs, 2003). Algunos autores incluso han intentado caracterizar la respuesta aerodinámica del vehículo situado sobre un puente (Suzuki et al., 2003; Barcala y Meseguer, 2007). Una manera de reducir las cargas aerodinámicas sobre el vehículo (fuerza lateral y el momento de vuelco) es mediante el uso de barreras cortaviento, cuyo efecto ha sido analizado experimentalmente cuando el tren está situado en un viaducto (Kwon et al., 2001; Barcala y Meseguer, 2007). Con una altura de parapeto suficientemente grande puede obtenerse una reducción significativa en los coeficientes aerodinámicos, efecto que es mejorado con el uso de aleros en los parapetos.

El flujo de alrededor de un puente, ya sea con o sin parapetos, esta determinado por el desprendimiento de la capa límite. Cuando el tablero está libre de barreras cortaviento la capa límite se desprende en las partes superior e inferior de barlovento. Si el ángulo de ataque es suficientemente pequeño normalmente la capa de cortadura se vuelve a adherir a la zona superior del tablero, formándose una burbuja de recirculación. Sin embargo, con ángulos de ataque elevados la capa límite desprendida en las zonas superior e inferior se mezclan formando una amplia estela corriente abajo del puente. Por supuesto, incluso para ángulos de ataque pequeños, aparece una estela corriente abajo por el desprendimiento de la capa límite en los bordes de sotavento. Cuando se emplean parapetos en el puente, la altura del punto de desprendimiento de la capa límite aumenta con el tamaño del parapeto, y la distancia vertical de la capa de cortadura al tablero aumenta en consecuencia (Barcala y Meseguer, 2008).

Si la barrera cortavientos es suficientemente alta, la capa de cortadura resultante puede incidir sobre la catenaria, empeorando la calidad de la corriente en la región cercana al hilo de contacto. Los resultados experimentales obtenidos muestran, como cabía esperar, que ciertas combinaciones de ángulo de ataque y de altura de parapeto aumentan sensiblemente la intensidad de turbulencia cerca de la catenaria, y en consecuencia el riesgo de aparición de inestabilidades aeroelásticas como el galope.

## **2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Para determinar la intensidad de turbulencia en la catenaria se han realizado ensayos en un túnel aerodinámico de circuito abierto, con una cámara de ensayos de 1.8 m de alto, 0.2 m de ancho y 1.8 m de largo. Las velocidades se han medido mediante un sistema de anemometría de hilo caliente DANTEC (una sonda tipo 55P16 conectada a un módulo 90C10 CTA). El muestreo se realizó a 500 Hz durante 20 s (valores escogidos tras varios ensayos preliminares).

La intensidad de turbulencia se mide situando la sonda de hilo caliente en las posiciones correspondientes al hilo de contacto de barlovento y de sotavento (Figura 1). Al orientar el

hilo caliente paralelo a la catenaria, la velocidad media registrada es la correspondiente al plano ortogonal a la catenaria (plano  $xz$  de la Figura 1). De los registros temporales de cada configuración se obtienen tanto la velocidad media,  $U$ , como la desviación típica,  $\sigma$ , necesarias para el cálculo de la intensidad de turbulencia,

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U}, \quad (1)$$

y de la intensidad de turbulencia reducida, definida como el cociente

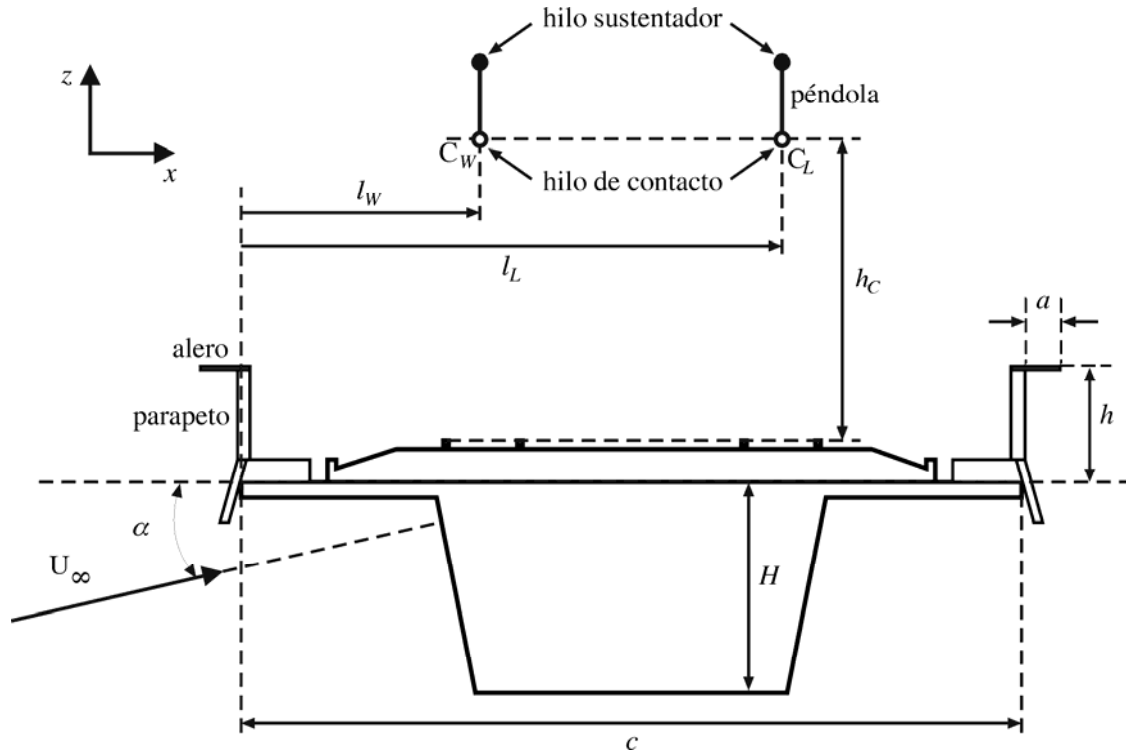
$$\eta = \frac{I_u}{I_{u0}}, \quad (2)$$

donde  $I_{u0}$  representa la intensidad de turbulencia medida sin ningún tipo de parapeto en el puente para el ángulo de ataque,  $\alpha$ , correspondiente.

No ha sido necesario reproducir la capa límite atmosférica en los experimentos, ya que en el problema considerado (puente con parapetos) la longitud necesaria para apreciar cambios significativos en el gradiente vertical de velocidades es mucho mayor que la altura del parapeto. A partir de la velocidad del viento corriente arriba,  $U_\infty$ , el ancho del tablero del puente,  $c$ , y la viscosidad cinemática del aire,  $\nu$ , se define el número de Reynolds ( $Re = U_\infty c / \nu$ ). En el caso de los ensayos realizados el número de Reynolds ha sido aproximadamente  $5 \times 10^5$ . Teniendo en cuenta el borde singular de barlovento y el valor suficientemente elevado del número de Reynolds, el flujo alrededor del puente es supercrítico, y por tanto puede considerarse prácticamente independiente del número de Reynolds.

La sección del modelo reproduce una sección típica de puente de doble vía a escala 1/50 (Figura 1), con un ancho de tablero  $c = 280$  mm. Ambos hilos de contacto se sitúan a una altura  $h_C = 106$  mm sobre el punto medio entre raíles y a una distancia  $l_W = 85$  mm y  $l_L = 195$  mm desde el borde de barlovento del tablero. En la peor situación, la relación entre la sección del modelo y la de la cámara de ensayos es menor de 0.1, de modo que no es necesario realizar correcciones de los resultados por bloqueo.

Tal como se indica en la Figura 1, los parapetos considerados consisten en una pared sólida de 2.5 mm de espesor colocada verticalmente sobre el borde de la cubierta. Se analizaron cuatro alturas de parapeto,  $h = 25$  mm, 35 mm, 45 mm y 55 mm. Los parapetos pueden estar equipados con aleros, colocados perpendicularmente en su borde superior, habiéndose considerado cuatro longitudes de alero,  $a = 0$  mm, 5 mm, 10 mm y 15 mm. Aunque se estudiaron dos cantos de puente ( $H = 65$  mm y  $H = 85$  mm), al no encontrarse diferencias significativas entre los resultados correspondientes, por cuestión de espacio sólo se presentan los resultados correspondientes al canto  $H = 65$  mm.

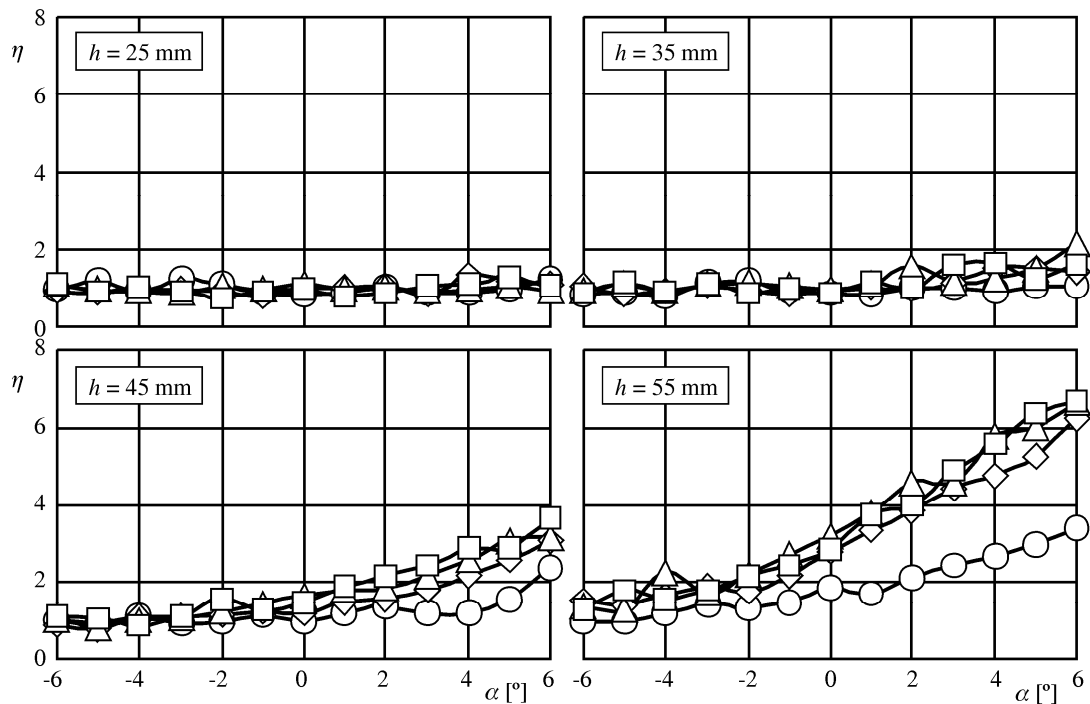


**Figura 1 – Sección del modelo.**  $C_W$  y  $C_L$  representan las catenarias de barlovento y de sotavento, respectivamente.

Cada configuración de barrera y alero se ha ensayado, para las dos posiciones del hilo de contacto, a trece valores del ángulo de ataque (de  $\alpha = -6^\circ$  a  $\alpha = 6^\circ$  en incrementos de  $1^\circ$ ). Además, para comprobar la influencia de la porosidad de las barreras se construyeron parapetos similares a los sólidos, pero con trece agujeros de 10 mm de diámetro, espaciados uniformemente en el ancho del parapeto. La porosidad del parapeto,  $\phi(h)$ , se define como el cociente entre el área de los agujeros y el área frontal del parapeto. Como el área de los agujeros coincide en todos los parapetos, la porosidad  $\phi$  disminuye con la altura del parapeto  $h$  ( $\phi(25) = 15\%$ ,  $\phi(35) = 11\%$ ,  $\phi(45) = 8\%$ , y  $\phi(55) = 7\%$ ).

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

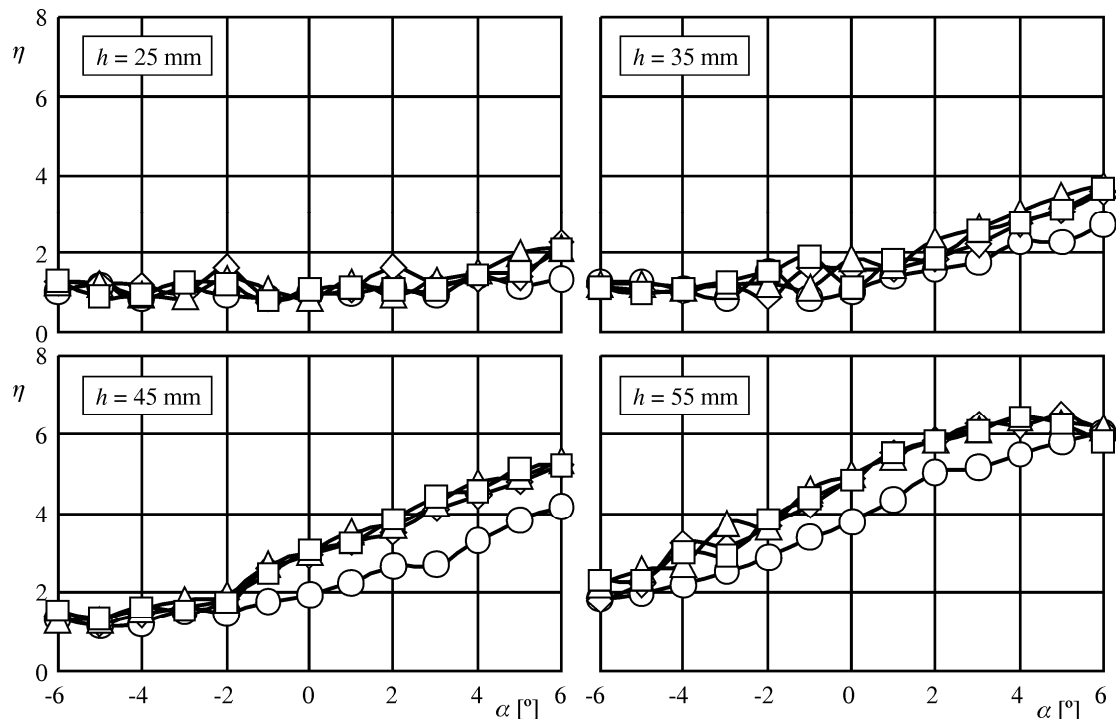
La variación de la intensidad de turbulencia reducida con el ángulo de ataque para la catenaria de barlovento, cuando el puente está equipado con barreras sólidas, se muestra en la Figura 2. Al aumentar el ángulo de ataque la estela formada tras el parapeto se ensancha, de modo que si el ángulo de ataque es suficientemente alto el hilo de contacto podría situarse dentro de la estela, lo que aumentaría la intensidad de turbulencia en el hilo de contacto. Un efecto similar se produce con la altura del parapeto, ya que determina el tamaño de la región desprendida corriente abajo.



**Figura 2 – Intensidad de turbulencia reducida,  $\eta$ , en función del ángulo de ataque,  $\alpha$ , para la catenaria de barlovento. Las etiquetas indican la altura de las barreras sólidas. Cada curva corresponde a una longitud de alero ( $a = 0$  mm, círculos;  $a = 5$  mm, rombos;  $a = 10$  mm, triángulos;  $a = 15$  mm, cuadrados). El canto del viaducto es  $H = 65$  mm.**

Este razonamiento también es aplicable para explicar la tendencia de los resultados representados en la Figura 3 para la catenaria de sotavento cuando el puente está equipado con barreras sólidas. Hay que destacar que la intensidad de turbulencia reducida en el hilo de contacto de sotavento es mayor que el correspondiente a barlovento, si se mantienen constantes los parámetros restantes. Los aleros aumentan la distancia vertical de la capa de cortadura al tablero, y en consecuencia la intensidad de turbulencia en ambas catenarias será mayor si el parapeto está equipado con aleros. Nótese que en la posición de sotavento la intensidad de turbulencia reducida es casi independiente de la longitud del alero.

La tendencia de los resultados correspondientes al modelo de puente equipado con parapetos porosos es cualitativamente análoga a la mostrada en el caso de parapetos sólidos. Por cuestiones de espacio no se incluyen las gráficas correspondientes, aunque sí se exponen algunos comentarios. Las barreras porosas permiten el paso de parte de la corriente a través de ellas, reduciendo la distancia entre la capa de cortadura y el tablero en la región cercana al parapeto respecto a la correspondiente a una barrera sólida, además este flujo inyectado en la burbuja de recirculación impide que la capa límite se readhiera, y en consecuencia, la región desprendida se estrecha para ángulos de ataque pequeños, mientras que a valores altos ocurre lo contrario. El efecto de utilizar parapetos porosos, comparando con barreras sólidas, es un flujo menos perturbado alrededor de la catenaria de barlovento, a cambio de empeorar aún más la calidad del flujo en la catenaria de sotavento cuando el ángulo de ataque es elevado.



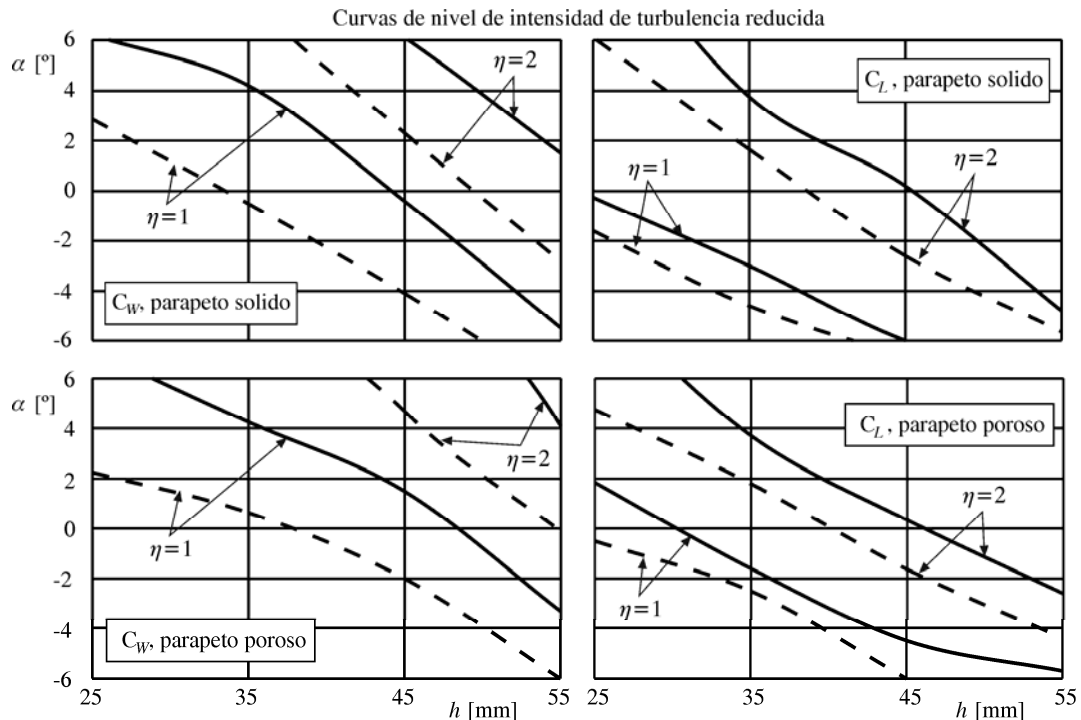
**Figura 3 – Intensidad de turbulencia reducida,  $\eta$ , en función del ángulo de ataque,  $\alpha$ , para la catenaria de sotavento. Las etiquetas indican la altura de las barreras sólidas. Cada curva corresponde a una longitud de alero ( $a = 0$  mm, círculos;  $a = 5$  mm, rombos;  $a = 10$  mm, triángulos;  $a = 15$  mm, cuadrados). El canto del viaducto es  $H = 65$  mm.**

En la Figura 4 se representa la intensidad de turbulencia reducida en función del ángulo de ataque y de la altura de parapeto, tanto para parapetos sólidos como porosos. Por claridad sólo se han considerado dos valores de intensidad de turbulencia reducida,  $\eta = 1$  y  $\eta = 2$ , (obtenidos por interpolación de los resultados mostrados en las Figuras 2 y 3). Como la dependencia de los resultados con la longitud del alero es pequeña, los resultados de los parapetos con alero se han resumido en una sola curva, correspondiente al valor medio de las distintas configuraciones. De acuerdo a su definición, ecuación (2), la intensidad de turbulencia reducida no puede ser inferior a 1, de modo que las curvas  $\eta = 1$  definen el límite superior de las regiones donde la influencia de los parapetos es despreciable. En la Figura 4 se aprecia, como ya se ha señalado, que la catenaria de barlovento está menos influenciada que la de sotavento por el efecto introducido por el parapeto, es decir, son necesarios mayores ángulos de ataque para alcanzar valores  $\eta > 1$ .

#### 4. CONCLUSIONES

El viento transversal por una parte genera cargas aerodinámicas en los trenes de alta velocidad que pueden comprometer la estabilidad del vehículo, pero además puede inducir oscilaciones no amortiguadas en la catenaria. El riesgo de entrar en un modo de operación no segura es mayor en aquellas zonas donde el tren se encuentra más expuesto al viento transversal, como es el caso de los viaductos y los terraplenes. Para mejorar la estabilidad del vehículo se pueden

emplear barreras cortavientos, pero la presencia de dichos elementos puede deteriorar la calidad del flujo incidente en las catenarias. Con el fin de evaluar ese impacto se ha realizado un estudio experimental sistemático para determinar la intensidad de turbulencia en la catenaria. Los resultados obtenidos son una primera aproximación al problema, pero aún así este estudio proporciona información cualitativa sobre la influencia de las barreras cortaviento en la corriente incidente sobre el hilo de contacto.



**Figura 4 – Variación de la intensidad de turbulencia reducida,  $\eta$ , con la altura del parapeto,  $h$ , y el ángulo de ataque. La línea continua representa barreras sin alero mientras que la discontinua corresponde a la media de las barreras con alero.  $C_W$  y  $C_L$  indican el hilo de contacto de barlovento y de sotavento, respectivamente.**

La intensidad de turbulencia reducida en la catenaria aumenta con el ángulo de ataque del viento transversal, tanto en parapetos sólidos como porosos. Añadir aleros a los parapetos aumenta el efecto de su estela sobre los hilos de contacto, si bien la intensidad de turbulencia reducida parece ser independiente, en cierta medida, de la longitud del alero.

A modo de guía de diseño, en la Figura 4 se representa para ambos tipos de parapeto y posiciones del hilo de contacto, el incremento de la intensidad de turbulencia reducida en función de una variable de diseño (la altura del parapeto) y de un parámetro de operación (el ángulo de incidencia del viento transversal sobre el puente).

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Fomento, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, bajo el contrato PT-2007-024-17CCPM.

## REFERENCIAS

BAKER, C.J. (1986). Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 24, pp. 227–251.

BARCALA, M.A. y MESEGUER, J. (2007). An experimental study of the influence of parapets on the aerodynamic loads under cross-wind on a two-dimensional model of train vehicle on a bridge. *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F. Journal of Rail and Rapid Transit* 221, pp. 487–494.

BARCALA, M.A. y MESEGUER, J. (2008). Visualization study of the influence of parapets on the flow around a train vehicle under cross-wind. *Proceedings of Comprail 2008, Eleventh International Conference on Computer System Design and Operations in the Railway and Other Transit Systems*. WIT Press, Wessex.

DIEDRICHS, B. (2003). On computational fluid dynamics modelling crosswind effects for high-speed rolling stocks. *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F. Journal of Rail and Rapid Transit* 217, pp. 203–226.

JOHNSON, T. (1996). Strong wind effects on railway operations - 16th October 1987. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 60, pp. 251–266.

KHIER, W., BREUER, M. y DURST, F. (2000). Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study. *Computers & Fluids*, 29, pp. 179–195.

KWON, H., PARK, Y., LEE, D. y KIM, M. (2001). Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, pp. 1179–1195.

SANQUER, S., BARRÉ, C., DUFRESNE DE VIREL, M. y CLÉON, L.M. (2004). Effect of cross-winds on high-speed trains: development of a new experimental methodology. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92, pp. 535–545.

STICKLAND, M. y SCANLON, T. J. (2001). An investigation into the aerodynamic characteristics of catenary contact wires in a cross-wind. *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F. J. Rail and Rapid Transit* 215, pp. 311–318.

SUZUKI, M., TANEMOTO, K. y MAEDA, T. (2003). Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross-winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, pp. 209–218.